

seraient échangés? Existe-t-il une description «duale», où les monopôles magnétiques représenteraient les objets élémentaires, tandis que les particules familières – quarks, électrons, etc. – apparaîtraient comme des solitons?

Une particule fondamentale de charge e , par exemple, serait équivalente à un soliton de charge $1/e$. Comme la charge d'une particule mesure l'intensité de ses interactions, un monopôle interagirait faiblement quand la particule originelle interagit fortement (c'est-à-dire quand la charge est grande), et *vice versa*.

La démonstration de cette conjecture faciliterait considérablement le travail des physiciens théoriciens. Dans la théorie des quarks, par exemple, les physiciens ne peuvent calculer les situations où les quarks interagissent fortement. En revanche, les monopôles interagiraient alors très peu, de sorte qu'on pourrait calculer les interactions de monopôles, avant d'en déduire, dans l'espace dual, les résultats sur les quarks. Malheureusement, on manquait de méthodes pour démontrer la conjecture.

Alors que les physiciens se décourageaient, on découvrit que les p -branes sont également analogues à des solitons. En 1990, Andrew Strominger, de l'Institut de physique théorique de Santa Barbara, a trouvé qu'une corde à dix dimensions correspond à une 5-brane qui se comporte comme un soliton. Reprenant une de mes conjectures, A. Strominger a proposé qu'une corde interagissant beaucoup soit l'équivalent dual de 5-branes qui interagiraient peu.

Cette idée était intéressante, mais manquait de fondement : d'une part, la dualité entre électricité et magnétisme à quatre dimensions restait hypothétique, de sorte que la dualité entre cordes et 5-branes à dix dimensions était encore plus douteuse. Ensuite, comme on ignorait comment trouver les propriétés quantiques des 5-branes, on voyait mal comment prouver la nouvelle dualité.

Le premier obstacle fut levé lorsque Ashoke Sen, de l'Institut de recherches fondamentales Tata, à Bombay, établit que les théories supersymétriques prévoient l'existence de solitons qui portent à la fois une charge électrique et une charge magnétique, comme ceux que conjecturaient C. Montonen et D. Olive. Ce résultat convertit de nombreux sceptiques et suscita une avalanche d'articles scientifiques. Notamment, il poussa

4. LA DIMENSION SUPPLÉMENTAIRE refermée en un tube permet d'apercevoir la construction de l'espace-temps.



Nathan Seiberg, de l'Université Rutgers, et E. Witten à rechercher la dualité dans des versions plus réalistes (quoique toujours supersymétriques) des théories des quarks. Les deux physiciens ont obtenu, à propos des champs quantiques, des résultats inespérés.

La dualité des dualités

En 1990, plusieurs théoriciens ont généralisé l'idée de la dualité de C. Montonen et D. Olive aux supercordes à quatre dimensions, domaine où l'idée devient encore plus naturelle. Cette dualité, qui demeurerait spéculative, est la dualité S .

Entre-temps, les théoriciens des cordes s'étaient habitués à un tout autre genre de dualité : la dualité T , qui relie deux types de particules qui émergent lorsqu'une corde forme une boucle autour d'une dimension compacte. Les particules d'un premier type (les particules «vibrantes») sont analogues à celles qui avaient été prédites par T. Kaluza et O. Klein : elles résultent des vibrations de la corde refermée sur elle-même (voir l'encadré de la page 70), et elles sont plus énergiques si le cercle est petit. En outre, la corde peut s'enrouler plusieurs fois autour du cercle, comme un élastique autour d'un poignet ; son énergie croît à mesure qu'elle s'enroule et que le cercle s'agrandit. Chaque niveau d'énergie représente une nouvelle particule (il correspond à une particule d'«enroulement»).

La dualité T stipule que les particules d'«enroulement» pour un cercle de rayon R sont identiques aux particules «vibrantes» pour un cercle de rayon $1/R$, et *vice versa*. Pour un physicien, les deux ensembles de particules sont indiscernables : une dimension compacte, épaisse, donne apparem-

ment les mêmes particules qu'une dimension mince.

L'identification de cette dualité est importante. Pendant des décennies, les physiciens ont cherché à comprendre la nature aux échelles extrêmement petites, près de la longueur de Planck, égale à 10^{-33} centimètre. Ils ont toujours supposé que les lois de la nature, telles que nous les connaissons, ne s'appliquent pas aux distances inférieures. Cependant, selon la dualité T , l'Univers apparaît le même à ces échelles et aux grandes distances. On peut même imaginer que, si l'Univers rétrécissait jusqu'à ce que son rayon soit inférieur à la longueur de Planck, il se transformerait en un univers dual qui enflerait progressivement.

La dualité entre cordes et 5-branes demeurerait cependant conjecturale en raison des problèmes de quantification des 5-branes. Dès 1991, à l'Université du Texas, Jianxin Lu, Ruben Minasian, Ramzi Khuri et moi-même avons résolu le problème en l'évitant. Nous avons démontré que, si quatre des dix dimensions sont refermées en boucles et si la 5-brane s'enroule autour d'elles, cette dernière devient un objet unidimensionnel, une corde (de type soliton) dans un espace-temps à six dimensions. De surcroît, une corde fondamentale à dix dimensions reste fondamentale même à six dimensions. Ainsi le concept de dualité entre cordes et 5-branes a abouti à une autre conjecture : la dualité entre une corde de type soliton et une corde fondamentale.

Comme on sait quantifier les cordes, on peut tester les prévisions de cette dernière dualité. On peut démontrer, par exemple, que l'intensité des interactions de cordes de type soliton est inversement proportionnelle à l'intensité d'interaction des

cordes fondamentales, comme le prévoyait la conjecture.

Puis, en 1994, à Cambridge, Christopher Hull et P. Townsend proposèrent qu'une corde hétérotique qui interagirait faiblement soit la duale d'une corde de type IIA qui interagirait fortement, si elles ont toutes deux six dimensions : les différences entre les trop nombreuses théories des cordes s'estompent.

D'autre part, j'ai compris que la dualité corde-corde a une autre retombée inattendue : si nous réduisons l'espace-temps de six dimensions à quatre dimensions, en admettant que deux dimensions sont des boucles, la corde fondamentale et la corde de type soliton ont chacune un homologue par une dualité T . Or la duale T d'une corde de type soliton n'est rien d'autre que la duale S de la corde fondamentale, et *vice versa* ! Ce phénomène – où l'échange de charge dans une représentation est une inversion de longueurs dans la

représentation duale – est nommé dualité des dualités. La dualité S , jusqu'à spéculative, se retrouve sur un pied aussi ferme que la dualité T , bien établie. En outre, elle prédit que l'intensité d'interaction des objets – leur charge – dépend de la taille des dimensions invisibles. Ce qui est une charge dans un univers peut être une longueur dans un autre.

Au cours d'un exposé mémorable, à l'Université de Californie du Sud, en 1995, E. Witten a synthétisé tous les travaux sur la dualité T , la dualité S et la dualité corde-corde sous la bannière de la théorie M à onze dimensions. Au cours des mois suivants, des centaines d'articles ont été échangés sur le réseau Internet, confirmant que les membranes jouent certainement un rôle important dans la théorie M .

Même la théorie des cordes $E_8 \times E_8$, dont l'hélicité paraissait impossible à déduire en onze dimensions, trouve une origine dans la théorie M . À Prin-

ceton, E. Witten et Petr Horava ont montré comment compacter la dimension supplémentaire de la théorie M en un segment de droite. La théorie prévoit alors l'existence simultanée de deux univers à dix dimensions (chacun à une extrémité du segment) reliés par un espace-temps à onze dimensions. Les particules – et les cordes – n'existent que dans les univers des extrémités, qui ne communiquent que par l'intermédiaire de la gravitation (on peut imaginer que toute la matière visible de notre Univers se trouve sur un mur, alors que la « matière sombre, » supposée rendre compte de la masse invisible de l'Univers, se trouve dans un univers parallèle sur l'autre mur).

Comment tester expérimentalement la théorie M ? Les physiciens savent que l'intensité intrinsèque des diverses interactions dépend de l'énergie des particules qui transmettent ces interactions. Dans les théories supersymétriques, on trouve que les intensités des

Dualité dans l'espace-temps

La dualité T relie la physique des grands espaces-temps à celle des petits espaces-temps. Imaginons un espace-temps enroulé sur lui-même comme un cylindre. L'énergie d'une corde enroulée autour du cylindre varie de deux façons. Tout d'abord, elle varie quand la corde ondule : ce sont les « modes vibratoires ». Quand le diamètre est notable, les longueurs d'ondes des ondulations sont grandes, et les énergies sont faibles : les énergies correspondant aux différents nombres d'onde autour du cylindre sont séparées par de petites quantités ; les niveaux d'énergie sont peu espacés.

La corde peut aussi s'enrouler autour du cylindre comme un élastique tendu. Si le cylindre est gros, la tension importante de la corde correspond à une énergie élevée. Les énergies des états correspondant à des nombres différents de boucles – ou modes « d'enroulement » – sont espacées.

Examinons maintenant les niveaux d'énergie dans l'hypothèse d'un cylindre fin. Les ondes qui l'enveloppent sont de courte longueur d'onde, et leur énergie est élevée : les états « vibratoires » sont largement espacés. Inversement les boucles correspondent à des états de faible énergie, et les modes « d'enroulement » sont peu espacés.

Un observateur extérieur ne perçoit pas les origines physiques différentes des états de vibration et d'enroulement. Les tubes fins et les tubes épais conduisent aux mêmes niveaux d'énergie, que les physiciens interprètent comme les particules. Donc, les plus petites échelles de l'espace-temps peuvent donner exactement la même physique que les grandes échelles de notre Univers.

